

В заключение необходимо отметить, что детальный учет потерь энергии, прежде всего потерь на охлаждение турбинных лопаток и тепловых потерь в камере сгорания, не предусмотренный в рамках принятой расчетной модели, а также учет зависимости теплоемкостей от температуры приведет к изменению количественных характеристик полученных результатов, не изменяя качественного анализа.

Исследование выполнено в Уральском федеральном университете за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-19-00524).

#### Список литературы

1. Giuffrida A., Romano M. C., Lozza G. Thermodynamic analysis of air-blown gasification for IGCC applications // Applied Energy. 2011. V. 88. № 511. P. 3949–3958.
2. Design for F Class Blast Furnace Gas Firing 300 MW Gas Turbine Combined Cycle Plant / Toyooki Komori, Hiroyuki Hara, Hisato Arimura, Yohsuke Kitauchi // Proceedings of the International Gas Turbine Congress. Tokyo. 2003. Nov. 2–7.

УДК 536.49

Анисимова О. Ю., Шульц Л. Г.  
Самарский государственный технический университет  
oksanaanisimovaj@gmail.com

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ РАЗОГРЕВА БИТУМА ЭЛЕКТРОНАГРЕВОМ И ГАЗОМ

Самарское предприятие «Ротор» совместно со своими установками для производства асфальта поставляет емкости для хранения битума. При этом обогрев битума этих емкостей возможен как электричеством, так и горячей водой, получаемой в газовом водогрейном котле. Ниже, по заданию предприятия, приведен сравнительный расчет затрат разогрева битума электричеством и газом.

### *Исходные данные*

#### 1. Характеристика емкости для битума:

диаметр внутренний ( $d_{\text{вн}}$ ), м	– 3,2
длина ( $L$ ), м	– 10,72
толщина стенки ( $\delta_{\text{ст}}$ ), м	– 0,006
теплоемкость стали ( $C_{\text{ст}}$ ), кДж/(кг·гр.)	– 0,63
доля объема емкости, занятая битумом ( $r$ )	– 0,8
плотность металла ( $\rho_{\text{м}}$ )	– 7800

2. Характеристика изоляции емкости:	
материал	– маты прошивные
толщина ( $\delta_{из}$ ), м	– 0,1
плотность ( $\rho_{из}$ ), кг/м <sup>3</sup>	– 100
теплопроводность ( $\lambda_{из}$ ), Вт/(м·град)	– 0,036
теплоемкость ( $C_{из}$ ), кДж/(кг·град)	– 0,84
3. Характеристика битума:	
плотность ( $\rho_б$ ), кг/м <sup>3</sup>	– 1500
теплоемкость ( $C_б$ ), кДж/(кг·град)	– 1,9
скрытая теплота плавления битума ( $\mu$ ), кДж/кг	– 126
4. Характеристика природного газа:	
теплота сгорания ( $Q_г$ ), кДж/м <sup>3</sup>	– 33600
стоимость ( $Ц_г$ ), руб./м <sup>3</sup>	– 4,488
5. КПД газового нагрева масла ( $\eta$ )	– 0,8
6. Интервалы температур нагрева битума, °С:	
первый:	
– начальная температура ( $t'_1$ )	– 20
– конечная температура ( $t''_1$ )	– 120
второй:	
– начальная температура ( $t'_2$ )	– 120
– конечная температура ( $t''_2$ )	– 160
7. Время разогрева битума ( $\tau$ ), ч	– 48
8. Расчетная уличная температура ( $t_{ул}$ ), °С	– +20
9. Стоимость электроэнергии ( $Ц_{эл}$ ), руб./(кВт·ч)	– 4,935
10. Число рабочих суток в неделе ( $n$ )	– 7
11. Число часов в сутках ( $m$ )	– 24
12. Коэффициент теплоотдачи от внешней поверхности емкости окружающему воздуху ( $\alpha_в$ ), Вт/(м <sup>2</sup> ·град)	– 25

### Расчет

Первоначальной задачей расчета является определение общих затрат тепла (кДж) на разогрев всех элементов установки от начальной до конечной температуры. В эти затраты входят:

- нагрев и расплавление битума;
- нагрев металлической емкости;
- нагрев тепловой изоляции.

Количество теплоты, необходимое для разогрева непосредственно битума, кДж:

- в первом интервале температур:  $Q_{б1} = M_б \cdot [\mu + C_б \cdot (t''_1 - t'_1)]$ ;
- во втором интервале температур:  $Q_{б2} = M_б \cdot C_б \cdot (t''_2 - t'_1)$ .

Количество теплоты, необходимое для разогрева непосредственно металлической емкости, кДж:

- в первом интервале температур:  $Q_{е1} = M_е \cdot C_{ст} \cdot (t''_1 - t'_1)$ ;
- во втором интервале температур:  $Q_{е2} = M_е \cdot C_{ст} \cdot (t''_2 - t''_1)$ .

Количество теплоты, необходимое для разогрева тепловой изоляции, кДж:

- в первом интервале температур:  $Q_{из1} = M_{из} \cdot C_{из} \cdot (t_{1из} - t_{ул})$ .

Для всех этих элементов установки затраты теплоты определяются как произведение массы элемента установки на его теплоемкость и разницу температур в конце и начале нагрева. Кроме того, на расплавление битума затраты тепла определяются как произведение массы битума на скрытую теплоту плавления. Масса каждого элемента рассчитывается как произведение объема элемента на его плотность

$$M_e = 3,14 \cdot \rho_m \cdot \delta_{ст} \cdot [(d_{вн} + \delta_{ст}) \cdot L + 2 \cdot (d_{вн} + 2 \cdot \delta_{ст})^2 / 4].$$

$$M_6 = r \cdot V_e \cdot \rho_6.$$

$$M_{из} = 3,14 \cdot \rho_{из} \cdot \delta_{из} \cdot [(d_{вн} + 2 \cdot \delta_{ст} + \delta_{из}) \cdot L + 2 \cdot (d_{вн} + 2 \cdot \delta_{ст} + 2 \cdot \delta_{из})^2 / 4].$$

После определения общих затрат тепла рассчитываются количество электричества (кВт·ч) и объем сгоревшего газа ( $m^3$ ), необходимые для получения желаемого тепла.

Электрическая мощность, необходимая для прогрева емкости, кВт:

- в первом интервале температур:  $N_1 = \mathcal{E}_1 / \tau$ ;
- во втором интервале температур:  $N_2 = \mathcal{E}_2 / \tau$ .

Зная стоимость теплоносителей, можно определить затраты разогрева емкости с битумом при использовании соответственно электричества и газа.

Стоимость газового разогрева емкости, руб.:

- в первом интервале температур:  $C_{1г} = V_{г1} \cdot C_{эл}$ ;
- во втором интервале температур:  $C_{2г} = V_{г2} \cdot C_{эл}$ .

Необходимая общая тепловая мощность газового котла, кВт:  $N_k = N_1 / \eta$ .

Часовые потери теплоты (кДж/ч) через тепловую изоляцию емкости рассчитываются согласно уравнению теплопередачи. Температура наружного слоя изоляции после прогрева емкости, °С:

- в конце первого интервала температур:  $t_{1из}^H = t_{ул} + Q_{1из} / (\alpha_v \cdot F_{из} \cdot 3,6)$ ;
- в конце второго интервала температур:  $t_{2из}^H = t_{ул} + Q_{2из} / (\alpha_v \cdot F_{из} \cdot 3,6)$ .

Недельные затраты теплоты определяются как произведение часовых потерь тепла на число часов работы в неделю.

Количество электричества, необходимое для поддержания температуры битума на уровне 120 °С в течение недели, кВт·ч:  $\mathcal{E}_H = Q_H / 3600$ .

Денежные затраты на покрытие потерь тепла определяются через тепловые затраты потерь, стоимость электричества и газа.

Количество газа, необходимого для поддержания температуры битума на уровне 120 °С в течение недели,  $m^3$ :  $V_H = Q_H / (Q_g \cdot \eta)$ .

Стоимость электрического обогрева емкости в течение недели, руб.:

$$C_{Hэл} = \mathcal{E}_H \cdot C_{эл}.$$

Стоимость газового обогрева емкости в течение недели, руб.:  $C_{1г} = V_H \cdot C_g$ .

В результате расчетов затраты на обогрев битума электричеством оказались примерно в 8 раз больше, чем газом.